第 38 卷第 4 期
2017 年 4 月
工 程 热 物 理 学 报
JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS
Vol.38, No.4
Apr., 2017

预混滞止乙烯火焰碳质颗粒质量变化规律研究

王蒙达[1,2]　唐权喜[1,2]　游小清[1,2]

(1. 清华大学燃烧能源中心，北京　100084；
2. 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室，北京　100084)

摘　要　本文采用滞止火焰微孔探针取样，结合差分电迁移率筛分仪和离心式质量筛分仪，研究了不同滞止板取样高度和当量比对预混乙烯火焰碳质颗粒的质量和有效密度的影响。结果表明质量随电迁移率直接成指数变化，滞止板取样高度对质量 — 电迁移率指数 ε 影响不大，当量比对碳质颗粒有效密度的影响比较显著。

关键词　碳质颗粒；分辨率；有效密度；质量 – 电迁移率关系
中图分类号：TK16　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0253–231X(2017)04–0900–06

Studies on the Change of Soot Mass in Premixed Stagnation Ethylene Flame

WANG Meng-Da[1,2]　TANG Quan-Xi[1,2]　YOU Xiao-Qing[1,2]

(1. *Center for Combustion Energy, Tsinghua University, Beijing* 100084*, China;*
2. *Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing* 100084*, China*)

Abstract　The system consists of neutralizer, centrifugal particle mass analyser (CPMA), Long differential mobility analyser (Long-DMA) and ultrafine condensation particle counter (UCPC) are used to research mass-mobility relationship and effective density of soot in ethylene-oxygen-argon flame with different stagnation flame height above burner surface (H_p =1.2 cm, 1.6 cm, 2.0 cm) and different equivalence ratio (Φ = 2.0, 2.3). The results imply that sampling height above burner has a slight effection on mass-mobility exponent which is in the range of 2.37–2.50. Simultaneously, different equivalence ratio has a significant impact on effective density of soot.

Key words　soot; resolution; effective density; mass-mobility relationship

0 引　言

碳质细颗粒，由化石燃料不完全燃烧或者裂解产生，主要由碳、氢两种元素组成。燃烧过程中碳质细颗粒的存在对于辐射传热效果的增强尤为显著，导致燃烧热备的更容易损坏。一方面，大量的碳质颗粒被排入大气会降低可见度；而超细颗粒较长的停留时间增加了被人体吸入的几率，一旦吸入后极易沉积于肺部，随着血液进入血管，进而可能会引发呼吸道疾病和心血管疾病，对人体健康具有很大的危害；另一方面，碳质颗粒的另一种存在形式炭黑，常用于轮胎添加剂，可增强其耐磨性；用于染料敏化太阳能电池 [1] 或者甲醇燃料电池 [2] 中，可充当阴极催化剂。此外，碳质颗粒形成的过程研究也被用于指导其他纳米材料的火焰合成 [3]。

碳质颗粒可以用粒径、质量、有效密度、形态、体积分数等物理量描述；其中，粒径分布已被广泛研究，用于阐述碳质颗粒物的演变规律。其中早期代表性的研究来自 Zhao 等 [4] 的实验研究，发现由于成核与凝并的竞争，火焰中碳质颗粒的粒径分布会出现持续的双峰特性。其次，对碳烟颗粒的形貌的研究也比较广泛，有研究发现火焰中基本粒子是球形 [5]，而成熟碳质颗粒为类似于链式的分形团聚体，由直径在 10~15 nm 之间的基本球形颗粒组成 [3]。

随着实验技术的不断发展，出现了不少关于碳质颗粒质量及有效密度的研究。Maricq 等 [6] 采用串联差分电迁移率直径筛分仪 (DMA) 和静电低压撞击器 (ELPI)，研究发现乙烯火焰的碳质颗粒有效密度随取样高度增加而增加，而分形维数为常数。Olfert 等 [7] 将差分电迁移率筛分仪 (DMA) 和离心式颗粒质量筛分仪 (CPMA) 进行串联，研究发现低功率低硫分时碳质颗粒的有效密度较低，并随着电迁移率直径的增大而逐渐减小；在高功率高硫分情况下，分

收稿日期：2016-12-16; **修订日期**：2017-03-19
基金项目：国家自然科学基金项目 (No.91541122)；国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No.2013CB228500)
作者简介：王蒙达 (1994–)，男，博士研究生，主要从事燃烧过程中碳质细颗粒形成方面的研究。　**通信作者**：游小清，副教授，E-mail: xiaoqingyou@mail.tsinghua.edu.cn

形维数则由于硫酸的凝结而变大。Ghazi 等 [8] 对 McKenna 燃烧器预混乙烯火焰和 Inverted 燃烧器甲烷扩散火焰产生的颗粒的特性进行了探究。在不同当量比的情况下，对颗粒的质量、电迁移率直径、挥发性组分以及形态进行了详细的对比；Camacho 等 [9] 对预混乙烯火焰产生的电迁移率直径大约为 20∼80 nm 范围的碳质颗粒质量与电迁移直径关系进行了探究，研究结果表明团聚物并不满足球形假设，并用扩散受限分形簇团聚体、弹道分形簇团聚体以及多个基本颗粒线性排布模型与实验数据进行对比。为了揭示影响碳质颗粒质量及有效密度的主要因素，本文采用与 Camacho 等 [9] 工作类似的预混滞止火焰微孔探针取样，结合差分电迁移率筛分仪和离心式质量筛分仪，研究了不同滞止板取样高度和当量比对乙烯火焰碳质细颗粒的质量和有效密度的影响。

1 实验方法

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示，主要包括四个主要部分：燃料供应系统、燃烧系统、取样系统和测量系统。它的基本工作过程是：燃料、氧气及稀释气体氩气通过燃料供应系统进行定量供应和预混，然后通入燃烧系统中的 McKenna 层流预混燃烧器。燃烧器出口外围有一层环形保护氮气喷出，用于保持火焰稳定和隔绝外部空气。燃烧器表面是多孔介质，其中嵌有水冷系统，用于维持出口气体恒温和防止老化。燃烧器与取样系统中的滞止板之间形成层流预混滞止火焰。取样系统由滞止板与取样管、稀释气体管路、二次风、针阀以及真空泵组成。其中不锈钢取样管的外径为 0.635 cm，管上开有 0.4 mm 的取样微孔，取样管嵌入滞止板，并使取样微孔朝向燃烧器表面，孔轴线垂直于滞止板和燃烧器表面。同时，滞止板内设有水冷管路来维持滞止板温度，滞止板中嵌有 K 型热电偶来测量滞止板温度。滞止板平行放置于燃烧器表面上方，与燃烧器之间形成稳定的滞止火焰，这种取样方法参考文献 [3]。取样管上游通入 30 L/min (标准状况) 的冷氮气流来迅速稀释和冷却从小孔进入的碳质颗粒样本，取样管下游则连接着二次风与抽气装置，通过调整针阀的开度来控制微孔处的孔压。在取样过程中，稀释比 (稀释氮气与样品流量的比值) 与微孔孔压存在一定的函数关系，Abid 等 [10] 已有描述。最后碳质颗粒样本进入测量系统，测量系统主要是由 X 射线中和器 (Neutralizer, TSI 3087)、离心式颗粒质量筛分仪 (CPMA, Cambustion)、长型差分电迁移率筛分仪 (Long-DMA, TSI 3081) 和粒子计数器 (UCPC, TSI 3776) 组成。它的工作过程是：稀释氮气携带碳质颗粒样品进入中和器，中和器利用 X 射线源产生正负离子，从而使中和器出口的碳质颗粒样品携带已知的电荷分布 [11] 进入 CPMA；在 CPMA 中带正电的碳质颗粒受到方向相反的离心力与电场力，利用不同质量的碳质颗粒所受的离心力与电场力不同实现对样品筛分，使满足设定质量的碳烟能顺利通过 CPMA 并进入 Long-DMA。Long-DMA 和 UCPC 则对特定质量的单分散碳烟颗粒进行扫描与计数，最终得出这一质量的颗粒的电迁移率粒径分布。UCPC 采用高流量工作模式，气溶胶样品流量为 1.5 L/min，鞘气流量采用 15 L/min。该模式下 Long-DMA 扫描的粒径范围为 6∼220 nm。综合考虑测量效率和精确度，Long-DMA 采用 50 s 上扫和 10 s 下扫。

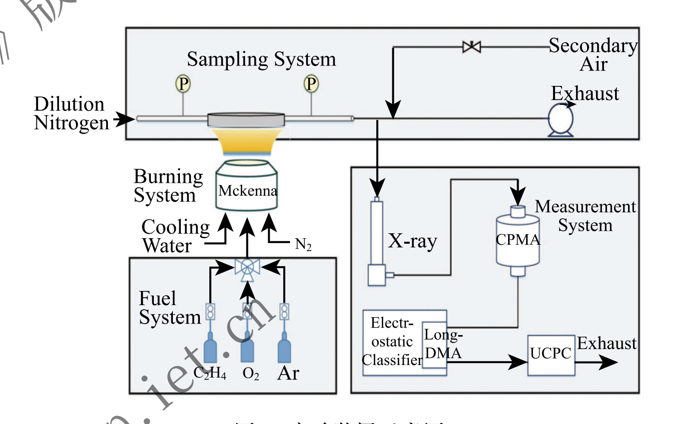


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experiment

本实验探究碳质颗粒质量与电迁移直径的关系，粒子数密度正态分布的电迁移率直径确定筛分质量的粒径。使用 CPMA 对单一质量的粒子进行筛分，实际出口粒子的电迁移率直径存在一个范围，主要有两个原因：一是 CPMA 和 DMA 存在扩散拓宽影响，二是存在一些非球形形状的粒子。测试发现小部分数量的颗粒损失对粒径正态分布的中值几乎没有影响。因此，本实验需维持较低孔压并保持不变，增大碳质颗粒样本的流量，以保证数密度保持在较高水平，从而减少随机误差，提高实验的可靠性。

1.2 CPMA 测量原理及参数设定

CPMA 作为一台新型的质量筛分仪器，其性能以及设定参数对质量筛分结果的影响尚不明确；同时，CPMA 对碳质颗粒的质量筛分效果又会直接影响到电迁移率直径扫描结果。尤其是其中的分辨率

(通过 CPMA 的最大质量颗粒的质量和设定筛分的质量之间的差值与设定筛分的质量之比)。因此我们需要对其重要参数 —— 分辨率 R_m 进行测试实验，实验装置如图 2 所示：由气溶胶发生器、扩散干燥管、X 射线中和器、差分电迁移率直径筛分仪 (DMA)、超细凝结核计数器 (UCPC) 组成。测试实验中采用 NaCl 气溶胶作为稳定粒子源，该粒子源可产生几纳米到几百纳米的气溶胶颗粒。工作过程是气溶胶发生器产生的 NaCl 液滴经过扩散干燥管干燥，形成 NaCl 气溶胶颗粒，由中和器使其荷电。其后经过 CPMA 进行质量筛分，最后由 DMA 和 UCPC 进行电迁移率直径的扫描计数。实验中携带 NaCl 气溶胶颗粒的氮气采用 4 L/min 的流量，气溶胶发生器中的 NaCl 浓度为 2 g/100 ml。DMA 选择鞘气流量为 15 L/min，样品气体流量为 1.5 L/min，相应的 UCPC 选择 1.5 L/min 的流量模式，仍然采用 50 s 上扫和 10 s 下扫。

为了探究不同分辨率对筛分不同质量颗粒的影响，我们分别对三个不同的筛分质量 (0.0177 fg, 0.14 fg, 1.13 fg) 进行分辨率影响的探究，结果如图 3 所示。图 3 中，处于同一列的上、中、下为一组，从左到右的三组分别代表筛分质量 (m^*) 为 0.0177 fg, 0.14 fg, 1.13 fg NaCl 颗粒的粒径分布；每一组三幅图从上到下分别代表 CPMA 设置的分辨率 (R_m) 为 5, 2, 0.5 的 NaCl 颗粒的粒径分布；每幅图中四种颜色的点分别代表了四组归一化后的结果；图中的曲线则代表用对数正态分布进行拟合；图中虚线则表示对数正态分布拟合的中值所在的位置。由图 3

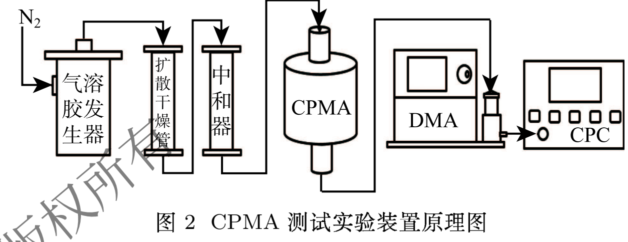


图 2 CPMA 测试实验装置原理图
Fig. 2 Schematic of CPMA test experiment

图 3 不同分辨率、不同筛分质量，NaCl 颗粒的粒径分布
Fig. 3 Particle size distribution function of NaCl with different mass and CPMA resolution

中明显可以看出分辨率较高时，通过筛分的颗粒粒径分布较窄，即对数正态分布的几何标准偏差 (GMD) 变小，并随着分辨率的减小，粒径分布的范围逐渐变宽，原因是随着分辨率的增加，不满足设定筛分质量的颗粒通过的数量减少。此外，当筛分的颗粒质量变小，为 0.0177 fg 时，分辨率为 2 的粒径中值与分辨率为 5 的粒径中值几乎一致，但分辨率下降为 0.5 时粒径分布的中值发生了明显的偏移；同时，当筛分质量变大，达到 1.13 fg 时，结果也类似。其偏移的结果可能是由于低分辨率时，CPMA 采用的转速较低，转速的偏差相对量较大导致；或者也可能是低分辨率筛分使设定值附近小范围质量的颗粒通过率过高，导致拟合中值出现偏差。

表 1 是不同分辨率工况下，筛分不同质量的 NaCl 颗粒所得到的粒径中值。实验结果表明，在三个不同的筛分质量中，分辨率 $R_{\rm m}=2$ 的粒径中值与 $R_{\rm m}=5$ 的粒径中值都相当接近。而分辨率 $R_{\rm m}=0.5$ 在筛分质量为 0.0177 fg 和 1.13 fg 时，粒径中值相差较大。为了计算得到 Nacl 颗粒的理论电迁移率直径，从而与实验结果进行对比。首先，利用 NaCl 颗粒的密度将颗粒筛分质量转化成体积当量直径 d_{ve}，再经由形状因子 χ 修正和滑移修正 C[12]，即可得电迁移直径理论值分别为 27.10 nm, 55.05 nm, 109.90 nm。由于后文中的研究对象——碳质颗粒的电迁移率直径大约在 20~150 nm 范围内，为保证实验的高效与精确，根据本次测试性实验的结果，我们采用 $R_{\rm m}=2$ 用于实验研究，由之前的理论值与实验值的比较可得出，在该分辨率条件下，测量系统的误差在 7 %以内。

表 1　不同分辨率、不同筛分质量 NaCl 颗粒粒径中值

Table 1　Median diameter of NaCl with different mass and CPMA resolution

分辨率 ($R_{\rm m}$)	粒径中值/nm		
	0.0177 fg	0.14 fg	1.13 fg
5	28.26	53.84	104.02
2	28.47	53.56	102.28
0.5	30.55	53.80	97.75

1.3　实验工况

本次实验所选用的火焰是研究较多的预混乙烯火焰 [3,5−6,8−10,13]，采用的是滞止平板小孔取样的方法 [10]。将生成的碳质颗粒经过串联的中和器和 CPMA-Long-DMA-UCPC 测量系统，依次测得不同质量碳质颗粒的粒径分布，将粒径分布进行对数正态拟合。对同一筛分质量的颗粒分别测量、拟合三次，并取拟合中值的平均值作为该质量碳质颗粒的电迁移率直径。最终，由测得的粒径中值结合筛分的碳质颗粒质量即可得出碳烟质量与电迁移率的关系以及有效密度。

本次探究性实验采用 6 组不同的实验工况，如表 2 所示。表中包含两个当量比：$\Phi=2.0$ 和 2.3，每个当量比分别包括三个滞止火焰高度：$H_p=1.2$ cm、1.6 cm 和 2.0 cm。其中实验 1~3、4~6 两组实验用于探究不同取样高度，对碳质颗粒质量与电迁移率直径的关系和有效密度的影响。对比试验 1、4(2、5 和 3、6)，则可得到在相同的滞止火焰高度，不同当量比对碳质颗粒生长的影响。

2　结果与讨论

2.1　质量与电迁移率直径的关系

不同当量比以及不同高度实验条件下 (具体实验工况见表 2 序号 1~6)，质量与电迁移率直径的关系如图 4 所示。其中，绿色和蓝色分别代表当量比 2.0 和 2.3 的结果；正方形、菱形、圆形符号分别代表滞止板取样高度 1.2、1.6 和 2.0 cm。横纵坐标分别表示筛分的质量与所测得的粒径平均值。

由图 4 可见，碳质颗粒电迁移率直径随质量的增大而增大。当量比 $\Phi=2.0$ 时，相同质量碳质颗粒的电迁移率直径明显大于当量比为 $\Phi=2.3$ 时的电迁移率直径。推测原因可能有：1) 当量比 $\Phi=2.0$ 形成的颗粒 C/H 比较小；2) 当量比 $\Phi=2.0$ 团聚体内基本粒子颗粒排布比较疏松。后文将进一步讨论

表 2　实验工况

Table 2　Summary of flame conditions

序号	当量比	滞止火焰高度/cm	组分/%			气体流速/(cm/s)
			C_2H_4	O_2	Ar	
1	2.0	1.2	14.40	21.60	64	7
2	2.0	1.6	14.40	21.60	64	7
3	2.0	2.0	14.40	21.60	64	7
4	2.3	1.2	15.62	20.38	64	7
5	2.3	1.6	15.62	20.38	64	7
6	2.3	2.0	25.62	20.38	64	‘7

这种推测的正确性。此外，从图 4 中可以看出不同的滞止板取样高度对同一当量比产生的具有相同质量碳质颗粒的电迁移率直径影响不大。

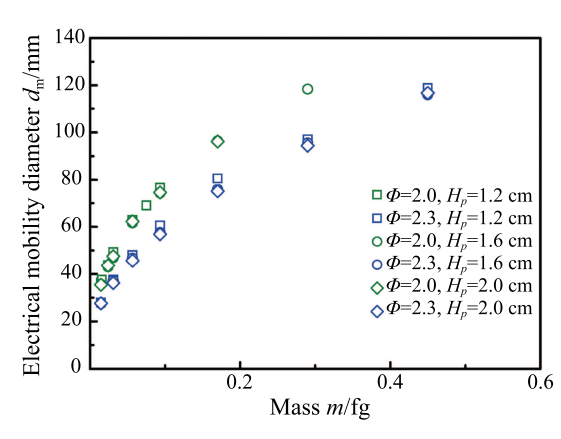


图 4 不同当量比及不同滞止板取样高度，不同质量碳质颗粒的电迁移率直径分布

Fig. 4 Relationship between particle mass and mobility diameter with different heights from burner and equivalence ratio

Schmidt-Ott 等 [14] 假设电迁移率直径 (d_m) 与基本粒子数量 (N_{pp}) 呈幂指数关系。同时，由于组成团聚物的基本粒子都是在相同的环境中形成，其尺寸和密度被认为是相同的。因此，团聚体的质量 m_{agg} 与其中包含的基本粒子数成正比，与电迁移率直径成幂指数关系：

$$m_{agg}(d_m) = C \cdot d_m^{\varepsilon_m} \tag{1}$$

其中，C 是常数，称为质量–电迁移率直径指前因子；ε_m 是质量–电迁移率直径指数。我们使用式 (1) 对每组实验的碳质颗粒质量与电迁移率直径进行幂函数拟合，得到质量–电迁移率直径指前因子 C 和指数 ε。表 3 对六种不同实验工况的 C 和 ε 进行了总结。如表中所示，在不同当量比和滞止板取样高度的工况下，质量–电迁移率指数 ε 一直处于 2.37~2.50 的范围内，变化比较小，即不同滞止板取样高度对 ε 的影响并不显著；同时，当量比 $\Phi = 2.0$ 的指数 ε 比当量比 $\Phi = 2.3$ 的稍大，其影响比滞止板取样高度的影响更为显著。

其中，六种不同工况 (三个不同滞止火焰高度、两个不同的当量比) 下的质量–电迁移率指数如图 5 所示。正如我们所知，当质量–电迁移率指数 ε 等于 3 时，碳烟团聚物即为球形；ε 越接近 3，则说明碳烟团聚物越接近球形。从图 5 中我们可以发现，当量比 $\Phi = 2$ 时，ε 明显大于当量比为 2.3 的情况，因此，该当量比条件下产生的碳烟团聚物更接近球形，即更紧凑。结果明显与 (3) 这个假设的原因不相符，至于实际造成该现象的原因尚不明确，有待进一步的实验探究。

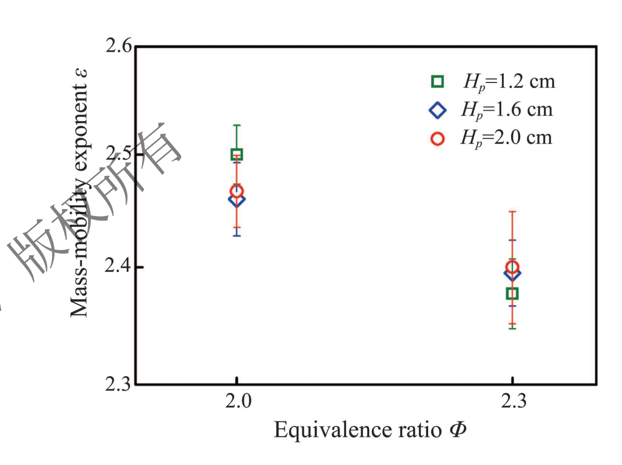


图 5 不同当量比及不同滞止板取样高度的碳质颗粒的质量–电迁移率直径指数

Fig. 5 mass-mobility exponent with different heights from burner and equivalence ratio

2.2 有效密度

有效密度对于颗粒的运输特性具有重要的作用，定义为以电迁移率直径为当量球形直径时的颗粒密度。同时，有效密度也可由质量–电迁移率直径关系 (2) 表示 [8]：

$$\rho_{eff}(d_m) = \frac{m}{\frac{\pi}{6}d_m^3} = \frac{6C \cdot d_m^{\varepsilon_m - 3}}{\pi} = C' \cdot d_m^{(\varepsilon_m - 3)} \tag{2}$$

其中，C' 是密度–电迁移率指前因子；ρ_{eff} 是有效密度。

表 3 不同当量比及不同滞止火焰高度质量–电迁移率指数 ε 和指前因子 C

Table 3 Mass-mobility exponent and pre-exponential factor with different heights from burner and equivalence ratio

序号	当量比	滞止火焰高度/cm	指数 ε	指前因子 C
1	2.0	1.2	2.50±0.03	$(9.11\pm4.12)\times10^{-2}$
2	2.0	1.6	2.46±0.03	$(3.11\pm1.71)\times10^{-2}$
3	2.0	2.0	2.47±0.03	$(3.50\pm1.90)\times10^{-2}$
4	2.3	1.2	2.38±0.03	$(1.33\pm6.78)\times10^{-2}$
5	2.3	1.6	2.40±0.03	$(1.94\pm9.35)\times10^{-3}$
6	2.3	2.0	2.40±0.05	$(2.15\pm1.77)\times10^{-2}$

图 6 表示不同滞止火焰高度时，不同当量比预混乙烯火焰产生碳烟的有效密度分布。可见，在当量比 $\Phi = 2.0$ 和 2.3 工况下，随着电迁移率直径的变大，碳烟的有效密度密度变小，这与碳烟团聚物的分形特征一致。Ghazi 等 [8] 和 Maricq 等 [6] 观察到的乙烯/空气预混火焰中颗粒的有效密度变化也遵循这一规律；其次，不同滞止板取样高度对有效密度影响不明显。而同一滞止板取样高度下，当量比 $\Phi = 2.0$ 条件下产生碳质颗粒的有效密度明显低于当量比 $\Phi = 2.3$ 条件下所产生的碳质颗粒有效密度，这与质量和电迁移率直径关系的结果一致，即相同质量的颗粒，$\Phi = 2.0$ 条件下产生的颗粒粒径明显大于 $\Phi = 2.3$ 条件下所产生的颗粒粒径。

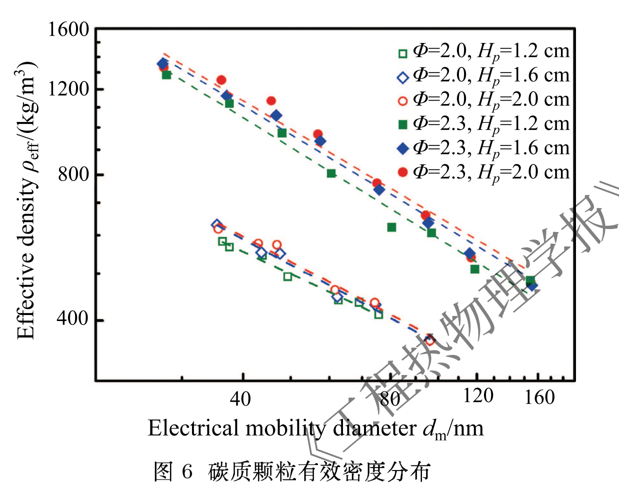


图 6　碳质颗粒有效密度分布

Fig. 6　effective density distribution based on mobility diameter with different heights from burner and equivalence ratio

3 结　论

本文采用具有代表性的 NaCl 测试气溶胶颗粒，对 CPMA 的不同分辨率进行测试，并对滞止板取样高度和当量比如何影响乙烯火焰质量 – 电迁移率直径关系及有效密度进行了探究，主要结论为：

1) 经过 CPMA 的筛分后，不同分辨率条件下 NaCl 气溶胶粒径分布都呈现对数正态的形式，选用分辨率 $R_m = 2$ 进行实验探究时，粒径中值误差在 7%以内。

2) 在 $\Phi = 2.0 \sim 2.3$，$H_p = 1.2 \sim 2.0$ cm 工况条件下，质量与电迁移率直径关系指数 ε 处于 2.37~2.50 范围内。ε 受滞止板取样高度 H_p 影响不大，而 ε 在当量比为 2 时的值明显大于当量比为 2.3 的值。

3) 不同滞止火焰高度对碳质颗粒的有效密度影响并不大，而不同当量比对碳质颗粒有效密度的影响比较显著。

参 考 文 献

[1] Kay A, Grätzel M. Low Cost Photovoltaic Modules Based on Dye Sensitized Nanocrystalline Titanium Dioxide and Carbon Powder [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1996, 44(1): 99–117

[2] Grätzel M. Dye-sensitized Solar Cells [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 2003, 4(2): 145–153

[3] Wang Hai. Formation of Nascent Soot and Other Condensed-phase Materials in Flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 41–67

[4] Zhao Bin, Yang Zhiwei, Johnston M V, et al. Measurement and Numerical Simulation of Soot Particle Size Distribution Functions in a Laminar Premixed Ethylene-oxygen-argon Flame [J]. Combustion and Flame, 2003, 133(1): 173–188

[5] Palmer H B, Cullis C F. The Formation of Carbon From Gases [J]. Chemistry and Physics of Carbon, 1965, 1: 265–325

[6] Maricq M M, Xu N. The Effective Density and Fractal Dimension of Soot Particles From Premixed Flames and Motor Vehicle Exhaust [J]. Journal of Aerosol Science, 2004, 35(10): 1251–1274

[7] Olfert J S, Symonds J P R, Collings N. The Effective Density and Fractal Dimension of Particles Emitted From a Light-Duty Diesel Vehicle With a Diesel Oxidation Catalyst [J]. Journal of Aerosol Science, 2007, 38(1): 69–82

[8] Ghazi R, Tjong H, Soewono A, et al. Mass, Mobility, Volatility, and Morphology of Soot Particles Generated by a McKenna and Inverted Burner [J]. Aerosol Science and Technology, 2013, 47(4): 395–405

[9] Camacho J, Liu Changran, Gu Chen, et al. Mobility Size and Mass of Nascent Soot Particles in a Benchmark Premixed Ethylene Flame [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(10): 3810–3822

[10] Abid A D, Camacho J, Sheen D A, et al. Quantitative Measurement of Soot Particle Size Distribution in Premixed Flames–the Burner-Stabilized Stagnation Flame Approach [J]. Combustion and Flame, 2009, 156(10): 1862–1870

[11] Wiedensohler A, Lütkemeier E, Feldpausch M, et al. Investigation of the Bipolar Charge Distribution at Various Gas Conditions [J]. Journal of Aerosol Science, 1986, 17(3): 413–416

[12] Biskos G, Russell L M, Buseck P R, et al. Nanosize Effect on the Hygroscopic Growth Factor of Aerosol Particles [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(7) 2006, 33(7): 266–280

[13] Zhao Bin, Yang Zhiwei, Wang Jinjin, et al. Analysis of Soot Nanoparticles in a Laminar Premixed Ethylene flame by Scanning Mobility Particle Sizer [J]. Aerosol Science & Technology, 2003, 37(8): 611–620

[14] Schmidt-Ott A, Baltensperger U, Gäggeler H W, et al. Scaling Behaviour of Physical Parameters Describing Agglomerates [J]. Journal of Aerosol Science, 1990, 21(6): 711–717